

计算摄像学: 核心、方法与应用

索津莉¹ 刘焯斌¹ 季向阳¹ 戴琼海¹

摘要 针对现有计算机视觉、图形学、信号处理、数字图像处理、应用光学等领域无法通过现有成像模型与装置及计算方法获取足够目标场景信息的难题, 计算摄像学研究提出新的成像机制与对应的计算重构方法, 在光信号观测领域另辟蹊径, 创新性地将视觉信息处理与计算前移至成像过程, 从而极大地提高了信息优化计算的自由度, 能够在维度、尺度与分辨率上实现质的突破, 从而观测到传统成像系统“看不清”与“看不见”的场景信息. 本文沿着计算摄像学思路、方法与目标三条主线, 对国内外研究现状进行分析与综述, 期望能够帮助读者更快地了解及进入相关研究.

关键词 计算摄像学, 全光函数, 计算光路, 高维高分辨率, 计算重构

引用格式 索津莉, 刘焯斌, 季向阳, 戴琼海. 计算摄像学: 核心、方法与应用. 自动化学报, 2015, 41(4): 669–685

DOI 10.16383/j.aas.2015.c130855

Computational Photography: Keys, Methods and Applications

SUO Jin-Li¹ LIU Ye-Bin¹ JI Xiang-Yang¹ DAI Qiong-Hai¹

Abstract Current imaging mechanisms and systems cannot capture sufficient visual information of target objects/scenes in many fields, such as computer vision, graphics, signal processing, digital image processing, applied optics, etc. To address these challenges, computational photography has proposed new imaging mechanisms and corresponding reconstruction methods that bring the visual information processing forward to the acquisition process and largely raise the degree of freedom on information optimization. The computational acquisition approaches are able to breakthrough the bottlenecks in dimension, scale, and resolution, and thus can observe the scenes that cannot be captured clearly by traditional imaging systems. This review focuses on three main aspects of computational photography — strategy, approach, and target — and attempts to familiarize the readers with the studies in this field.

Key words Computational photography, plenoptic function, computational light path, high dimension high resolution, computational reconstruction

Citation Suo Jin-Li, Liu Ye-Bin, Ji Xiang-Yang, Dai Qiong-Hai. Computational photography: keys, methods and applications. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(4): 669–685

计算摄像学研究的科学问题是通过对载有场景本质信息的高维连续光信号进行优化耦合采集与计算重构, 在所获取的高维高分辨率成像结果下, 实现目标场景本质特性的高效高精度观测. 光源发出的光信号通过与场景发生相互作用, 成为场景信息的本质载体. 计算摄像学一方面设计子空间优化耦合采集, 实现高维连续光信号在成像系统有限信息带宽下的优化分布; 另一方面, 从传感器采集得的低维耦合信号进行对应的高维高分辨率信息计算重构. 最终, 能够从重构的高维高分辨率光信号中恢复出目标场景本质信息, 包括深度、几何、材质、运动及

相互作用等.

在计算摄像学领域, 通常使用七维全光函数 $f(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ 对光线进行描述: 在时刻 t 从三维空间任意位置 (x, y, z) , 沿着方向 (θ, φ) , 观察到的频率为 λ 、强度为 $|f(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)|$ 的光线. 光信号是场景信息的载体, 光信号的不同维度能够承载不同的场景特性, 因此, 高维高分辨率的光信号成像是更多、更本质场景信息获取的基础与关键, 也是计算摄像学的研究核心. 光源发出光信号, 传输至场景, 并与场景发生相互作用, 也即光信号受到场景信息的调制, 再传输至成像系统, 最终通过计算重构高维高分辨率光信号, 以及场景信息的解析. 成像过程中的各个要素 (光源、光路、镜头、传感、重构与显示等) 都可以引入计算, 实现更大自由度的优化, 从而在成像系统有限带宽下更有效地捕获场景信息, 这正是计算摄像学的主要研究方法. 而实现自然世界场景的有效观测, 在复杂环境与状态下, 获取目标场景特性, 为科学研究、生产生活等各领域的挑战性任务提供关键视觉信息, 推动其技术突破, 正是计算

收稿日期 2013-10-16 录用日期 2014-07-18
Manuscript received October 16, 2013; accepted July 18, 2014
国家自然科学基金 (61327902, 61120106003, 611711119) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61327902, 61120106003, 611711119)
本文责任编辑 黄庆明
Recommended by Associate Editor HUANG Qing-Ming
1. 清华大学清华国家信息实验室, 清华大学自动化系 北京 100084
1. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNLIST) and Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084

摄像学的研究目标。

本综述以光信号维度为索引, 对各维度信息的计算采集, 按照不同的计算成像方法进行结构分类, 并对所能实现的应用目标进行具体分析 (如图 1 所示), 旨在能够更好地帮助读者理解与思考。本文首先介绍计算摄像学的研究背景与概况; 接着, 分别针对空间、角度、频谱、时间维度的研究进行分析; 并讨论动态范围与极化的相关研究; 进一步, 介绍联合维度采集的研究发展; 分析突破几何光学限制的相关研究与方法; 最后, 对计算摄像学的未来发展进行展望。

1 研究背景与概况

光是物理世界信息观测的重要载体之一, 对高维连续光信号在空间、角度、频谱、时间各维度观测的实现与飞跃, 谱写了近百年诺贝尔自然科学奖的辉煌篇章, 如表 1 所列。从相衬显微镜、电子显微镜、隧道扫描显微镜至合成孔径射电望远镜, 人类不断超越观测的微观与宏观空间的尺度极限; 从干涉色彩重现至电子光谱仪、激光光谱仪, 人类不断提高所发现与利用的光谱范围与分辨率; 另一方面, 从全息摄影、核磁共振成像至飞秒光谱技术, 人类不断开拓与发展新的观测维度。而于 2009 年荣获诺贝尔物理学奖的电荷耦合器件的发明实现了光信号的数字化, 使得光信号的计算成为可能。

光信号是高维连续信号, 如上述诺贝尔自然科学奖发展历程所述, 其各个单一维度的观测能力已经有了革命性突破。但是, 随着社会发展与科技进步, 人们不断追求对物理世界的完整捕获与感知, 因此, 对光信号进行高维高分辨率的采样成为新的研

究目标。在光学数百年的发展历程中, 成像模型不断得以改进, 光照、镜头、传感、显示等成像要素得以不断创新, 从而能够传输更大信息量的光信号; 另一方面, 伴随电子信息技术所主导的新工业革命的到來, 数字信号计算与处理、机器视觉与学习等领域都有了大的飞跃, 从而能够实现更强大的智能信息计算。在这样的大背景下, CCD 与 CMOS 等感光器件的发明成为关键契机, 使得上述两大领域交叉融合, 催生了一门新兴交叉学科: 计算摄像学。计算摄像学为计算机视觉、图形学、应用光学、摄像学等领域带来了创新。本文瞄准计算摄像学中新的成像机制与计算重构方法下高维连续光信号的耦合采集问题, 实现了多尺度高维高分辨率计算成像。

表 1 与光信号观测相关的历年诺贝尔自然科学奖
Table 1 Related Nobel prizes in natural science

时间	研究内容	光信号观测
1908 年	干涉现象重现色彩	光谱维度
1953 年	相衬显微镜	空间维度
1971 年	全息摄影法	角度维度
1974 年	射电望远镜/合成孔径	空间维度
1981 年	高分辨率电子光谱仪	光谱维度
1981 年	激光光谱仪	光谱维度
1986 年	电子显微镜	空间维度
1986 年	扫描隧道显微镜	空间维度
1991 年	高分辨率核磁共振谱学	空间维度
1999 年	飞秒光谱学	时间维度
2009 年	电荷耦合组件	光信号可计算

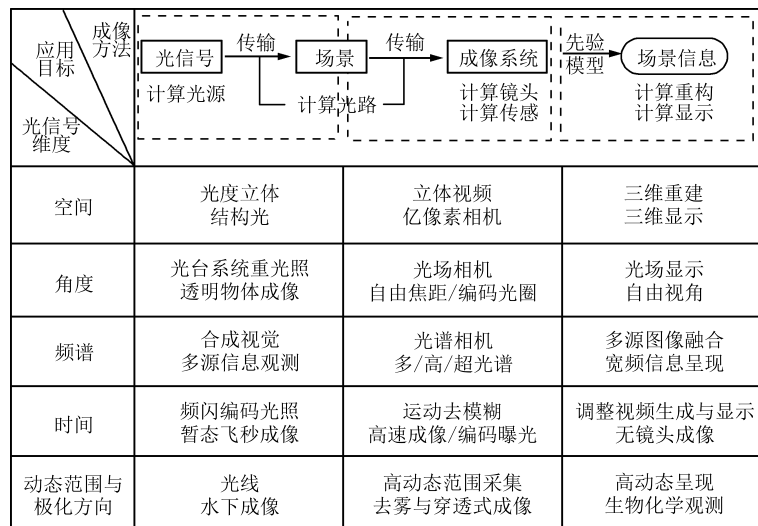


图 1 计算摄像学研究核心、方法与应用

Fig. 1 The keys, methods and applications in computational photography

光信号是许多领域研究的核心, 而不同研究领域, 如波动光学、傅里叶光学、几何光学等, 对其采用不同的描述. 麻省理工学院的 Adelson 等于 1991 年将七维全光函数 $f(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ 的概念引入视觉与感知研究, 并首次提出了光场相机模型^[1]. 但是, 经典成像模型是七维全光函数的一个二维投影子空间采样, 如图 1 所示. 通常, 相机仅在二维空间维度 (x, y) 上具有高采样能力, 即相机仅具有高空间分辨率, 而对其他维度的信息采样能力极其受限: 透镜对各个不同角度的光线进行积分 (θ, φ) ; 将三维信息投影至二维焦平面 (z) ; 传感器对连续光谱沿着 RGB 三个通道的响应曲线进行积分 (λ) ; 并每隔一帧时间在曝光时间内对达到传感器的光通量进行积分 (t) . 综上, 相机是一个低维耦合离散采样器. 高

维连续信号经过相机采样得到的结果是低维耦合离散信号, 通过先验信息与后处理计算, 有可能获取分辨率上的提高, 但无法实现高维高分辨率重构. 而计算摄像学从本质上突破现有成像模型的局限性, 将计算引入成像过程, 对光信号进行优化耦合采集, 使得计算重构能够突破传统信号处理的极限, 实现真实光信号的高维高分辨率计算成像, 如图 2 所示. 图 3 给出了不同维度子空间所对应的研究问题, 随着计算摄像学的发展, 所研究视觉信息从二维的图像、三维的视频到更高维的光传输, 其中, 尚有许多待探索的高维视觉信息.

计算摄像学领域发展至今已经有了近十年的历程, 为了研究高维连续光信号的计算采样, 研究者搭建了多种研究平台, 能够实现光信号的采样空间设计

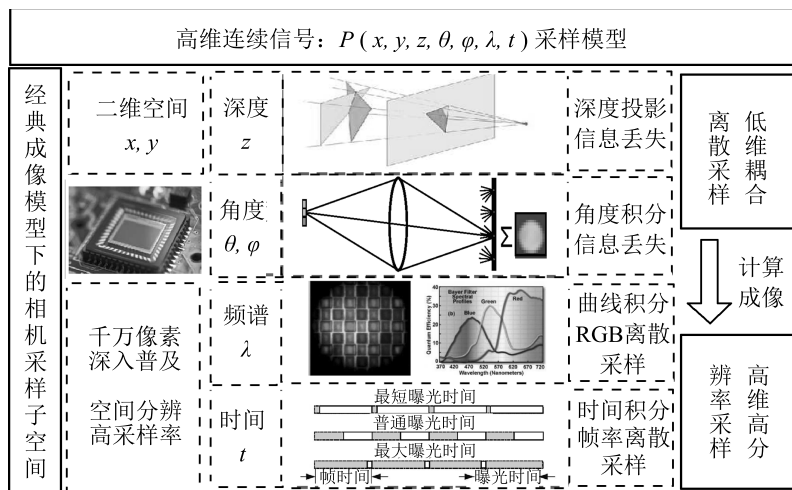


图 2 经典成像模型下高维连续视觉信息的低维离散耦合采样

Fig. 2 The low-dimensional discrete coupling sampler of the high-dimensional continuous visual information in conventional imaging model

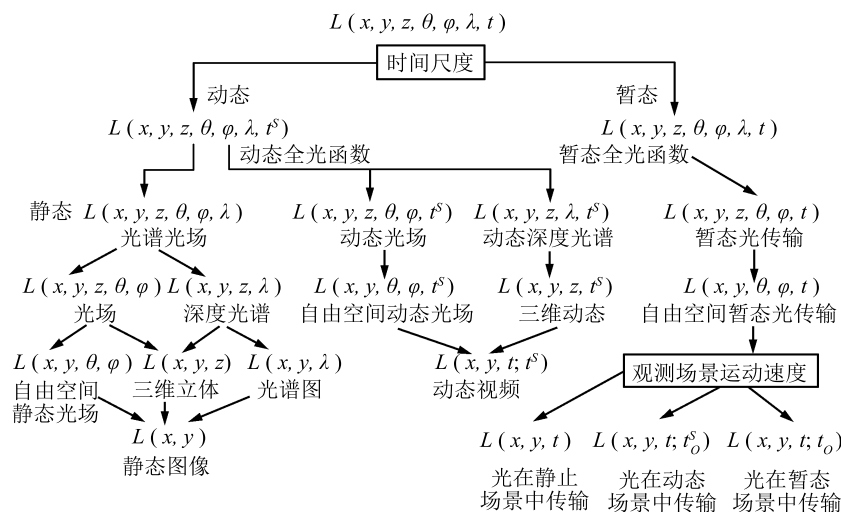


图 3 计算摄像学维度树状图

Fig. 3 The dimensional tree structure of computational photography

与优化,例如,清华大学于2009年搭建的变光照三维相机阵列光场采集系统^[2](图4(a)),斯坦福大学于2010年所实现的可编程可配置Franken相机^[3](图4(b))等,这些系统为计算摄像学基础理论与实际应用提供了实验基础.进一步,已经有一些研究成果成功地实现了产业化,例如,新型相机发展的先锋代表:无需对焦的光场相机^[4-5]LYTRO¹(图4(c));高精度微几何快速测量的变光照弹性传感相机^[6]GelSight²(图4(d))等.

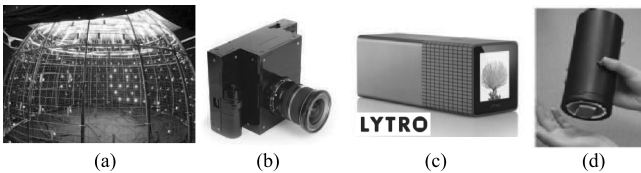


图4 计算摄像学研究平台与产业化成果

Fig.4 The research platform and industrial products of computational photography

2 空间维度

空间维度 x, y, z 的采样是决定了观测的尺度与分辨率,在场景三维重建、深度测量、对地观测、天文观测等等领域都具有重要的应用.但另一方面,通常情形下成像结果是七维全光函数的二维子空间投影,其耦合了场景材质特性,从而使得几何信息的恢复具有更高的病态性,本节将介绍能够克服或缓解该问题的计算成像方法.

2.1 场景光路

相机采集到的是光与场景相互作用后的结果,

因此,针对不同的应用,对光照进行对应地优化控制,使得更多的场景本质信息能够承载于光信号上.变化光照采集系统与结构光系统是实现场景光路优化计算采集的两种主要方式.其中,变化光照系统通常为球形或半球形光台系统^[7-10],在球面内部各个位置布满时间、强度、频谱可控的光源;结构光通常通过数字光输处理器(Digital light processor, DLP),通过控制DLP的输入信号即可实现光照的控制.

场景光路计算能够应用于高精度三维重建、复杂材质或透明材质的鲁棒重建与深度获取等.多光照下的多视角三维重建能够基于几何与光照的迭代优化得到更好的重建效果^[10],如图5所示.在光台系统下,使用新型球面光照设置结合多视角匹配与补偿计算能够获取高精度高帧率的三维重建结果^[11],接着,使用极化球面梯度光照能够获取高光作用下的高精度人脸几何^[12].进一步,连续球面谐波光照的计算光照系统克服了现有方法在高光、透光等复杂材质作用下的三维重建难点^[13].

基于结构光的场景计算光路在鲁棒场景几何重建和深度恢复问题上具有重要应用,例如,复杂全局光照作用下的鲁棒距离检测^[14-16]及精确几何重构^[17-18].此外,结合压缩感知的结构光技术在非均匀介质成像中具有重要作用^[19].

2.2 相机光路

空间维度的最直观体现是相机的空间分辨率,目前千万像素级相机已经广泛普及,但对大尺度和超高分辨观测中仍然无法应用.美国哥伦比亚大学与杜克大学的研究者^[20-21]已经提出并成功实现了

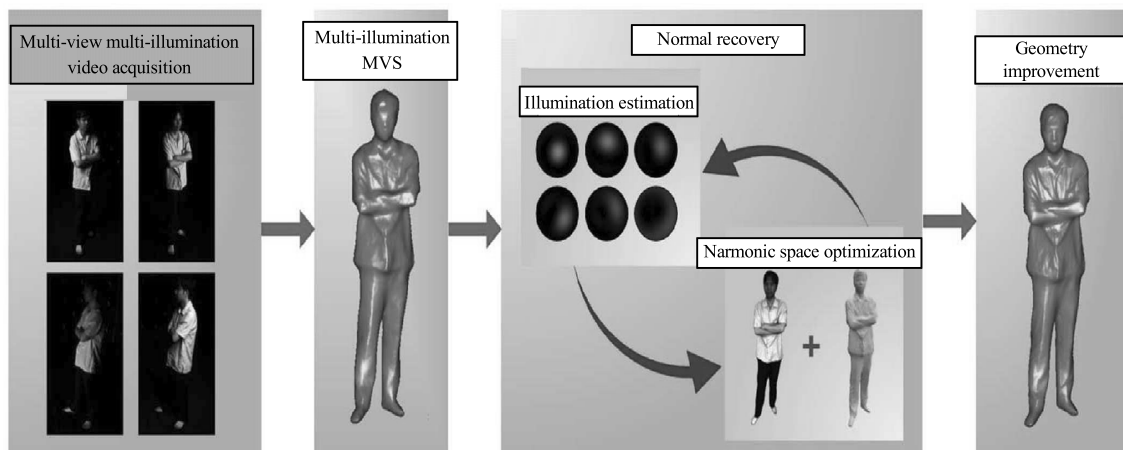


图5 多光照多视角三维重建方法概览^[22]

Fig.5 A overview of multi-illumination multi-view 3D reconstruction method^[22]

¹<https://www.lytro.com/>

²<http://www.gelsight.com/>

十亿像素级相机, 每次曝光都得到十亿像素分辨率的图像, 这种新型相机利用球形主透镜与微相机阵列克服了传统模型下的几何畸变等局限, 实现了光信号容量与像素容量的有效匹配. 此外, 通过在采集过程中控制传感器进行亚像素级的抖动, 能够实现高分辨率的视频捕捉^[23].

2.3 计算重构

计算摄像学中的计算重构是指对应于计算采集的“解码”, 也指以高维信息和场景的本质特性建立先验模型与假设, 从而获取高维高分辨率的信息. 例如, Deng 等^[24]发现了多视角采集下的点云数据之间的冗余性, 建立稀疏低秩模型, 实现高效高精度的点云融合与三维重建, 如图 6 所示.

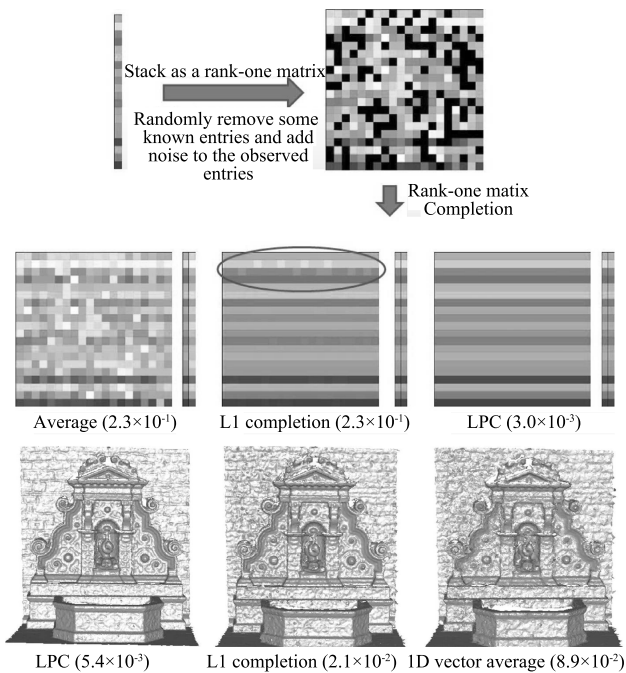


图 6 稀疏低秩的多视角深度融合思想与结果示例^[24]

Fig. 6 Illustrations and results of multi-view depth fusion via sparse and low-rank matrix completion^[24]

镜头是相机成像质量的重要决定因素, 专业相机都配有昂贵的高品质镜头, 而普通相机受到镜头几何畸变、颜色失真等局限, 成像质量下降. 为此, Heide 等成功实现了基于计算重构的简单镜头高品质成像方法^[25].

3 角度维度

在普通采集图像中, 光线的角度信息完全丢失, 但是该信息是场景光照、材质、几何等重要特性的载体, 在计算摄像学中, 通过获取角度信息能够实现重光照、材质获取与建模、重聚焦(自由聚焦)、光照

显示等应用.

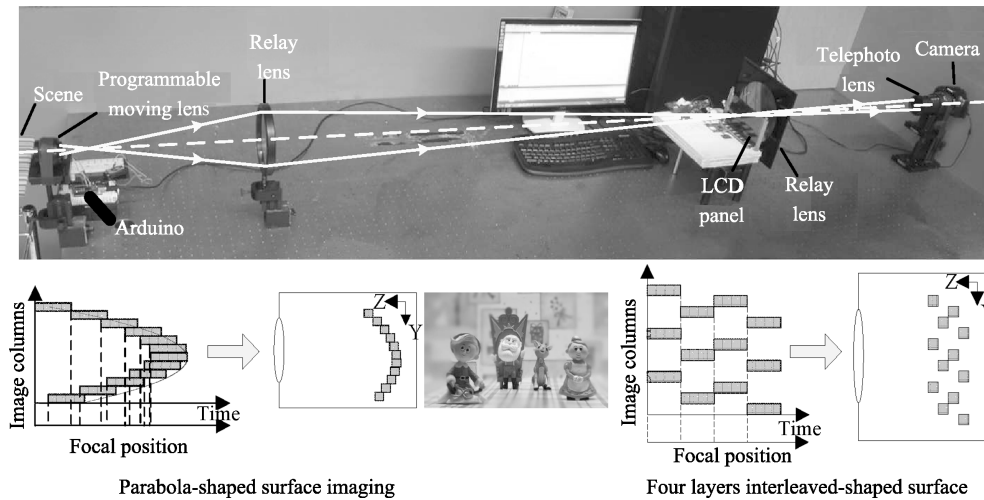
3.1 场景光路

重光照与场景物体双向反射分布函数 (Bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 的获取是图形学的重要研究方向, 计算摄像学的研究极大地促进与启发了新的思路与方法, 例如在光台系统下的场景计算光路, 结合基于图像的渲染, 实现了数据驱动的重光照方法^[7-9], 并成功应用在电影及游戏工业中. Wetzstein 等提出了光场光照的方向性“编码”光源, 实现了透明物体的有效成像^[26], 并能够直接测量物体的折射率并进行几何重构^[27].

3.2 相机光路

光场相机是采集二维空间和二维角度的新型相机系统, 对相机内部的光路进行计算主要有两种实现方法. 1) 通过微透镜阵列将像空间焦平面上的光线按照不同角度映射到不同的传感器像素上, 因此, 需要牺牲一部分空间分辨率来换取角度分辨率^[4], 该方法在显微成像上也取得了成功^[28], 观测过程中无需调整焦平面, 且可以实时从不同角度观察样本. 2) 通过编码光圈或者特殊设计的掩膜进行实现, 编码光圈的本质是各个微视角的复用采集与解调^[29], 而基于掩膜的方法巧妙地通过掩膜将 4D 光场信息调制到传感器的 2D 频域空间, 再通过计算进行解调^[30]. 相比较第一种方法, 掩膜的方法更加灵活且空间分辨率更高, 但是由于掩膜阻挡了一部分光线, 从而造成了光通量较低的局限. 此外, 角度信息的获取还能够用于镜头眩光的消除^[31]. 除了相机内部设计的方法, 也可以通过相机阵列实现光场采集^[32]. 大规模相机平面阵列中不同相机采集场景中某一个点所发出的不同角度的光线, 等效于超大光圈成像, 从而可以实现宏观的“共聚焦成像”^[33].

在成像过程中, 可能由于各种原因没有实现目标物体的对焦, 计算摄像学中, 角度信息获取的重要目的之一正是实现重聚焦, 也就是改变原图像的焦平面. 麻省理工学院的研究者设计了多光圈成像系统^[34]实现大范围的景深计算控制, Levin 等发明了编码光圈实现散焦图像去模糊以及场景深度的同时优化计算的方法^[35]. 受到波前编码成像的启示^[36], Levin 等结合光场分析, 提出了能够实现深度无关成像的焦距晶格设计^[37], 使得散焦独立于场景深度, 通过简单的计算即可恢复清晰图像. Lin 等通过控制各个像素的曝光时序实现了编码焦栈设计^[38], 从而达到了非平面传感器的效果, 如图 7 所示. 进一步, 在时变光场分析的基础上, 研究者设计了相机短计算光路, 其成像结果不仅与深度无关, 还与运动无关^[39], 从而进一步提高了复杂场景的成像质量.

图7 编码焦栈系统及原理图^[38]Fig. 7 Coded focal stack system and its principles^[38]

显示与投影是成像的逆过程, 光场采集对应于光场显示, 大景深成像对应于大景深投影. 将普通2D显示调制为角度相关的4D光场显示主要有三种方法: 优化分层衰减^[40], 极化控制方向^[41]以及张量场优化的方法^[42]. 类似地, 对投影设备的光路进行时变编码光圈能够实现投影景深的扩展^[43], Ma等通过高阶优化实现了进一步优化^[44], 如图8所示.

3.3 计算重构

随着计算摄像学的发展, 研究者探索出空间-角度的四维光场符合一些特定的先验模型^[45], 这对角度维度的计算重构具有重要意义. 为了克服光场相机的低空间分辨率局限, 研究提出了光场超分辨的计算重构方法^[46]. 随着压缩感知技术的发展, 结合相机光路的计算, Marwah等提出了基于超完备字典和优化投影的压缩光场采样方法^[47], 通过计算的方法, 克服了之前光场相机的空间分辨率降低的本质局限. Levin等基于光场维度空缺实现了光场数据³的视角插值计算^[48]. Lin等提出了散焦去模糊与深度求解的迭代优化方法^[49], 同时实现了重聚焦与深度估计. 光线的角度信息在重光照中具有重要作用, 在简单的用户交互下, 仅基于单幅图像能够计算估计出粗略的场景光源与几何, 实现新物体在该场景中的渲染^[50].

4 频谱维度

光信号的频谱是连续函数, 物体材质的光频谱响应函数是重要的特性表征, 在科学研究和工业生产中都具有重要应用.

4.1 场景光路

人眼只能接收到可见光, 而最初以模拟人眼为目标的相机频谱响应函数也类似人眼的三个视锥, 分为RGB三个通道. 然而, 计算摄像学的目标不仅仅局限于逼近人类视觉系统, 而是以光信号的采集为根本. 对于超出400~700 nm波长的光信号, 能够承载不同的场景信息, 因此多源信息采集具有重要意义, 如无线电波、毫米波、红外、太赫兹、紫外、X射线等, 这也催生了合成视觉这一研究领域.

4.2 相机光路

为了突破RGB三通道采样或显示的耦合离散信号局限, Mohan等利用衍射光栅将入射光线散开为连续光谱, 并通过在光路中加入掩膜实现光谱的调制, 该方法在荧光物体成像、高动态范围成像等方面具有很好的应用^[51].

针对如何在短曝光时间内实现高光谱分辨率视频成像的难题, Cao等提出棱镜掩膜式光谱视频采集方法^[52], 并搭建了原型系统(如图9(a)所示), 该方法的核心思想是利用空间分辨率换取高精度光谱分辨率, 避免了增加额外的成像时间, 从而实现短曝光时间下的高精度光谱视频获取. 进一步, 针对棱镜掩膜式光谱视频采集中空间分辨率(千像素量级)过低的问题, Cao等又提出混合相机式高分辨率光谱视频捕获方法^[53]和系统(如图9(b)所示), 解决了光谱视频采集中同时获取高光谱分辨率和高空间分辨率的难题. 上述系统能够应用于材质鉴别、皮肤检测、视频分割、光源识别等诸多问题, 图9(c)展示了上述混合相机系统在一个皮肤检测实例上的效果. 上述超光谱视频采集系统的原理图如图10所示.

³公开的光场数据库: <http://lightfield.stanford.edu/>

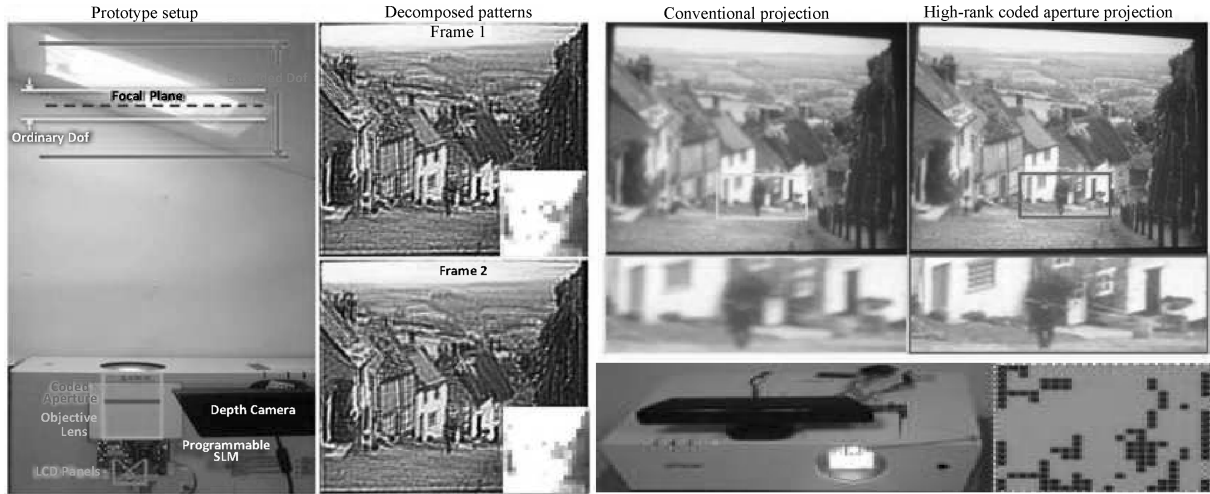


图 8 高阶编码光圈的大景深投影系统^[44]

Fig. 8 The system of high-rank coded aperture projection for extended depth of field^[44]

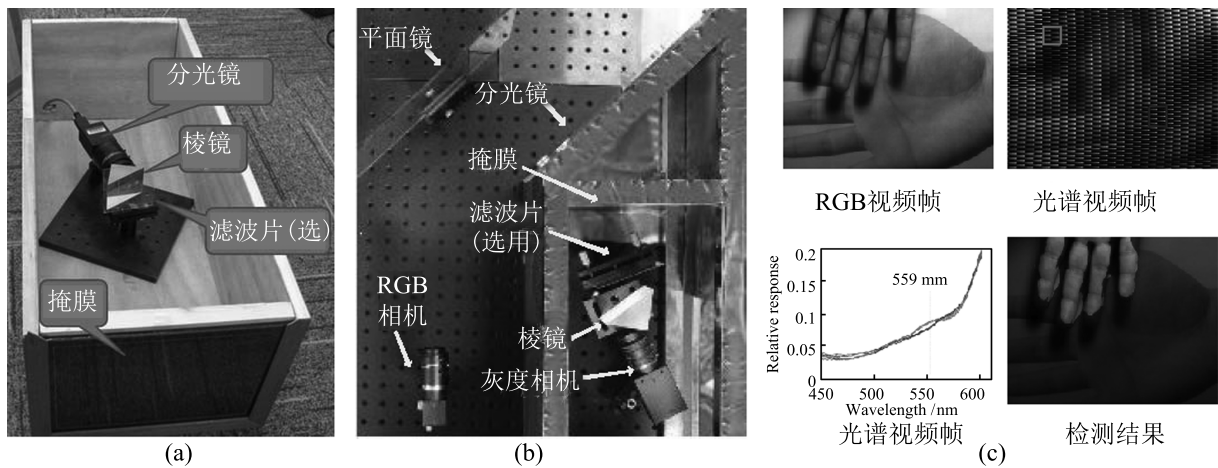


图 9 棱镜掩膜式与混合相机式光谱相机示意^[10-11]

Fig. 9 Prism-mask and hybrid-camera based spectral video capturing systems^[10-11]

4.3 计算重构

多源观测的有效实现离不开计算重构, 将同一场景在不同频段光源作用下的成像结果进行有效融合在对地观测、机载侦察以及医学、显微成像中都具有重要应用. 图像融合方向的研究很多, 这里介绍一种基于视觉信息结构化本质特征的融合方法^[54], 如图 11 所示.

5 时间维度

依据时间尺度的不同, 本节从“光速无限”假设下的高时间分辨与“光速有限”假设下的超高时间分辨两个方面出发, 概述相关研究工作.

5.1 稳态时间尺度

通常情况下, 场景随时间变化的速率相比较光的传播速度低了几个数量级. 因此, 在观测动态场景

随着时间的变化时, 人们习惯性地假设“光速无限”, 也即光在场景中已经处于稳态分布. 尽管目前高速摄像机已经有了长足的发展与应用, 但其价格昂贵, 且极短曝光时间对镜头与光照具有苛刻的要求. 因此, 研究如何利用现有的普通相机, 实现对高速场景的采集具有重要意义. 相关研究主要分为普通相机下的高速场景瞬时捕获与连续捕获: 前者通常也称作“运动去模糊”, 其并不改变相机帧率, 而是对采集到的模糊图像进行计算重构, 得到清晰的瞬时捕获结果; 而后者通常基于相机阵列, 通过多相机联合采集以突破单相机的帧率局限, 实现高速运动的连续捕获.

5.1.1 场景光路

麻省理工学院的 Edgerton^[55] 提出了基于频闪光照捕捉高速事件瞬间的成像技术. 在此基础上, 结合多相机的方法, Theobalt 等^[56] 实现了单次曝光下

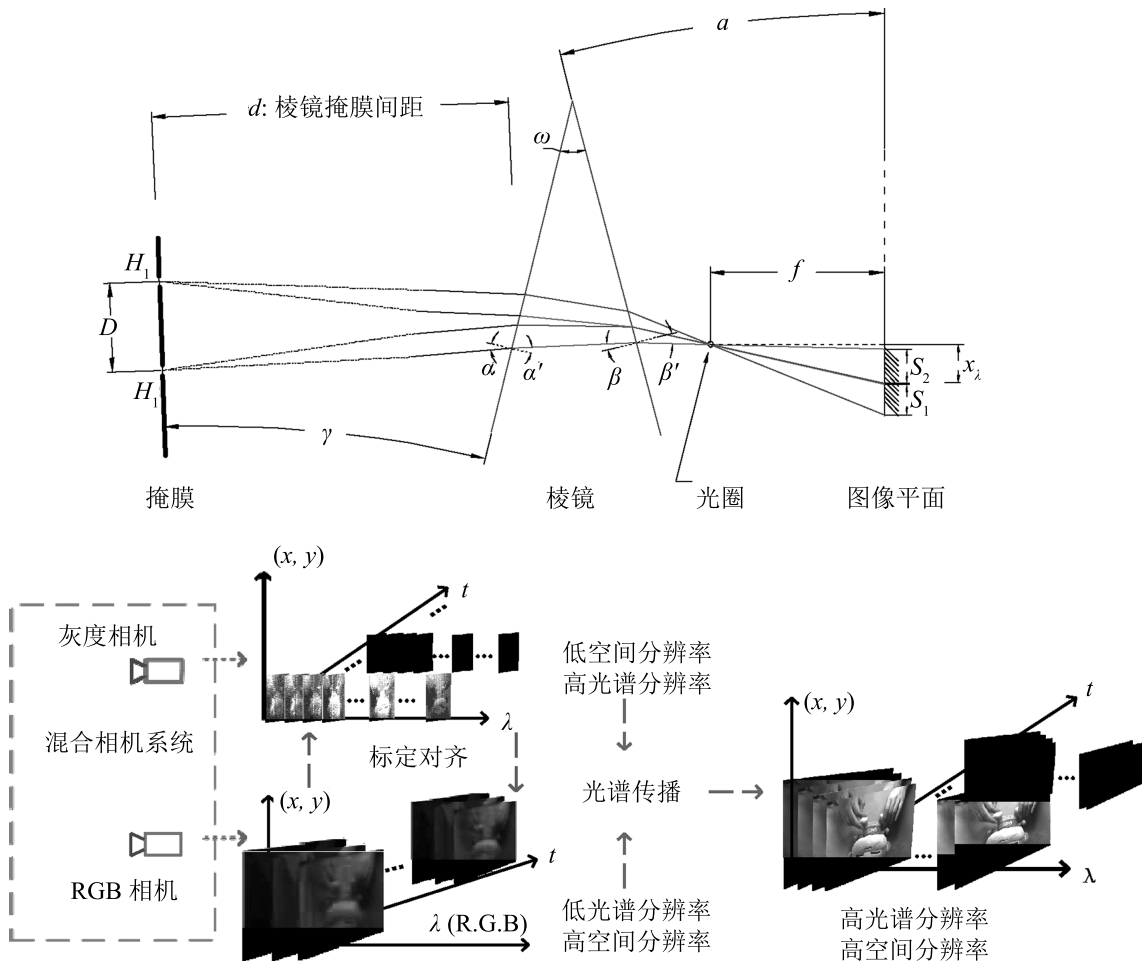


图 10 棱镜掩膜式与混合相机式光谱相机原理^[52-53]

Fig. 10 Illustrations of prism-mask and hybrid-camera based spectral video capturing methods^[52-53]

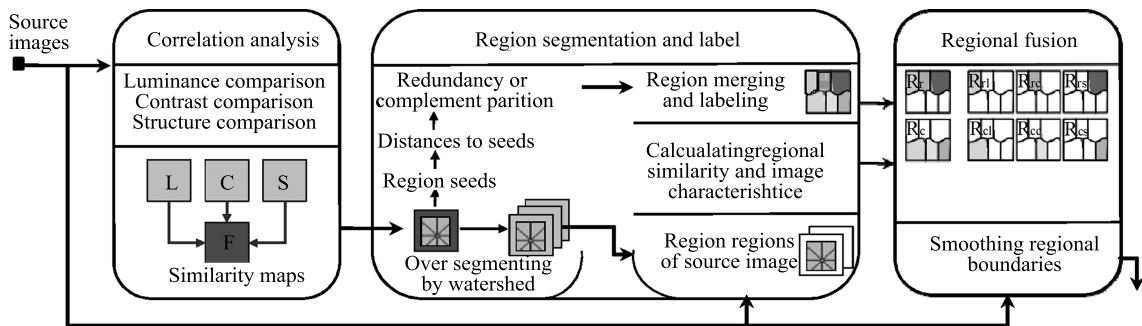


图 11 基于相似特性的区域图像融合方法原理示意^[54]

Fig. 11 Overview of a regional image fusion method based on similarity characteristics^[54]

棒球运动中手臂与球体的高速运动捕捉方法, 但其既无法恢复场景纹理, 也无法作用于复杂的场景几何. 此外, 利用数字光处理器 (Digital light processor, DLP) 对光照进行空域和时域编码^[57] 的计算光照方法, 能够应用于诸多主动视觉任务中, 以实现计算采集速度的提高. Veeraraghavan 等^[58] 提出了编码频闪光照结合稀疏重构技术的新型计算光照方法,

证明了仅需要单个普通相机即可实现周期性高速运动场景的高帧率计算成像.

5.1.2 相机光路

特定硬件系统设计下的高速成像方法, 一方面受限于高带宽需求: 采集至 RAM 的机制限制了相机能够采集的时间范围仅有几秒; 另一方面, 在多

视角应用下, 难以实现这些高速相机的精确同步. 近年来, 计算摄像学研究已经证明了传感器空间分辨率与时间分辨率之间的折中机制, 通过牺牲部分空间分辨率来换取高时间分辨率, 提出了一种基于分类像素的理论框架^[23], 并且已经通过数字微镜阵列 (Digital micromirror device, DMD) 的应用得到了实现与验证^[59]. 此外, 间插曝光相机阵列^[33, 60–62]下高速运动连续捕捉的相关研究, 历经了一维阵列到二维阵列的不断发展, 并且, 为了克服短曝光所引

起的低信噪比问题, 已经成功将编码曝光引入成像机制^[63], 但上述相机阵列系统的高时间分辨率的实现仍然依赖于空间分辨率的降低. Wu 等在三维相机阵列系统^[10, 64–65]的基础上, 研究空间维度信息的时间解析特性^[9], 实现兼有高时间分辨率与高空间分辨率的计算成像方法, 如图 12 所示. 此外, 低帧率摄像机系统也能够通过分组采集与计算插值的方法实现高帧率动态三维重建^[66], 如图 13 所示.

计算摄像学通过改进成像过程中的各个环节, 将

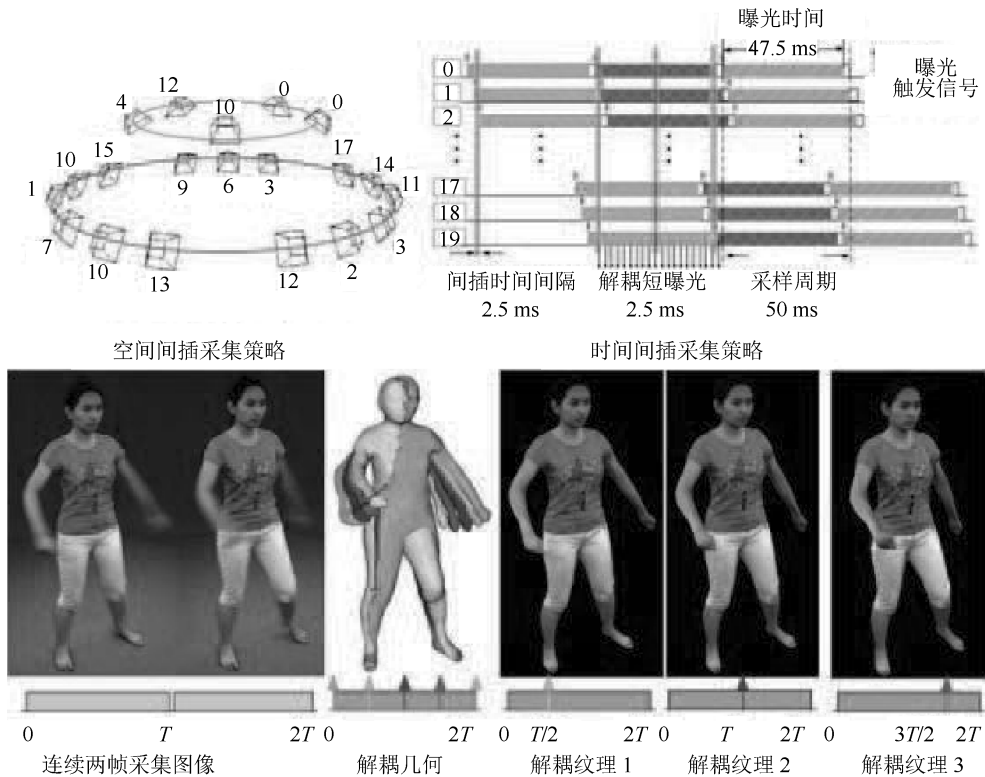


图 12 时间解耦的多视角高帧率计算采集方法^[9]

Fig. 12 Temporal decoupling high-speed multi-view computational capture method^[9]

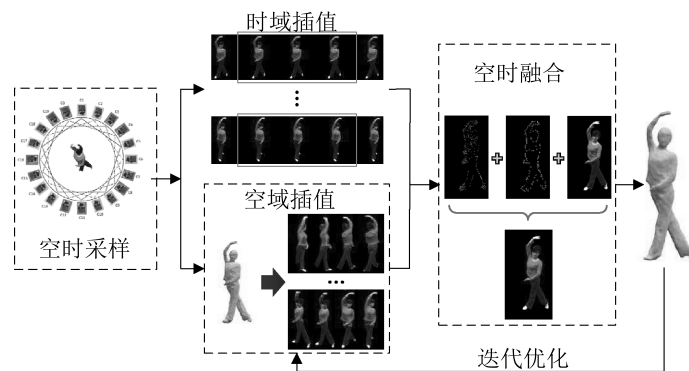


图 13 低帧率摄像机系统下的高帧率动态三维重建方法^[66]

Fig. 13 Overview of temporal-dense dynamic 3-D reconstruction with low frame rate cameras^[66]

更多的视觉信息耦合至低维采样空间, 为计算重构的逆问题求解提供了更多信息量与更好稳定性. 代表性工作主要有: 1) 直接测量或计算精确的 PSF: 利用惯性测量传感器^[67] 或对偶相机装置^[68-69], 一个相机采集高空间分辨率、低时间分辨率的视频信息, 而另一个相机采集高时间分辨率、低空间分辨率的视频信息. 2) 通过计算采集对 PSF 进行调制, 提高去模糊问题的稳定性: Raskar 等^[70-71] 首先提出了编码曝光采集方法, 利用相机快门在传感器的一次曝光时间内快速开闭变化来获取频域无零点的 PSF, 从而提高反卷积计算重构线性系统的正定性. 3) 通过计算采集设计新型 PSF: Levin 等^[72] 设计了一种抛物线式相机运动, 使得 PSF 与场景物体的运动方向与速度无关, 实现 PSF 估计、运动物体分割及去模糊计算的统一框架, 简化逆问题求解并提高稳定性. 但是上述两种方法均受限于场景的一维匀速直线运动. 尽管 Cho 等^[73] 利用正交抛物线型曝光实现了任意二维运动的去模糊, 但该方法以运动场景的连续两帧作为输入, 使其在快速运动的应用中受到限制. 4) 通过同时采集同一场景在两个不同模糊核作用下的模糊图像, 两幅图像在空间位置上精确对准, 并在频域具有很好的互补性, 在求解的过程中增加了模糊核间的确定映射关系作为约束条件, 并使问题成为联合可逆, 一定程度上降低了图像去模糊问题中的固有不确定性^[74], 如图 14 所示.

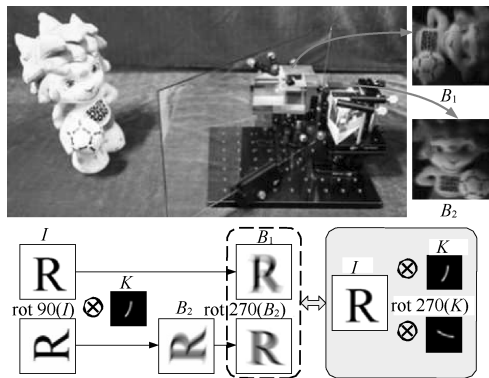


图 14 对齐互补模糊图像对的去模糊采集系统^[74]

Fig. 14 Aligned complementary image pair for blind motion deblurring system^[74]

5.1.3 计算重构

针对不同输入信息与运动情形, 完全基于后处理重构的方法 (或通常称为反卷积或盲解卷) 主要分为: 基于单幅图像与基于多幅图像的方法、空间一致模糊核与空间各异模糊核的方法, 以及假设隐含模型与无先验约束的方法等. 空间一致盲反卷的代表性工作由 Fergus 等^[75] 提出, 并通过考虑贝叶

斯框架下的模糊核估计误差, 实现了算法的改进^[76]. 基于多幅图像的去模糊方法的代表性工作由 Cho 等^[77] 提出. 此外, 通过建模运动模糊成像过程, 对成像模型进行合理假设, 能够计算得到低维参数的空间各异 PSF^[78-79], 例如, 针对静态场景采集中相机抖动的情况, 一组单应变换矩阵即可表征运动模糊成像过程. 然而, 上述方法仍无法克服基于图像的运动模糊成像模型的病态性: 场景运动过程中产生的遮挡、自遮挡以及参数化无法表征的复杂运动等. 此外, 基于路径插值的方法可以实现低帧率视频的时域上采样^[80], 该计算重构方法也可以用于视角间的插值等.

5.2 暂态时间尺度

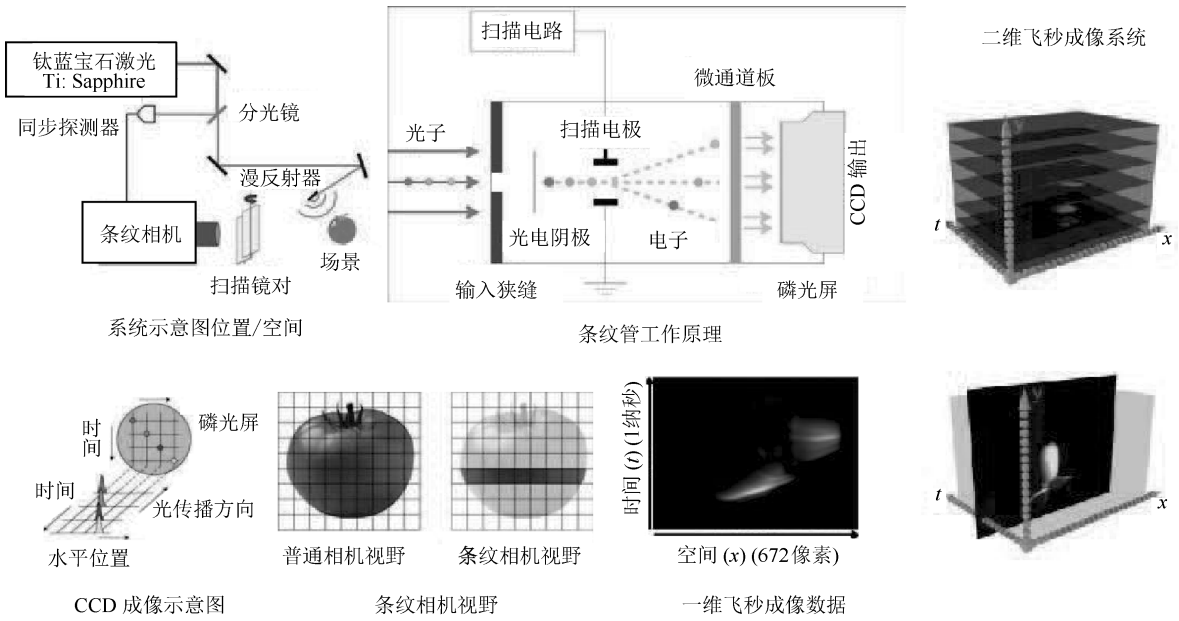
当待观测场景的运动速率与光速可以相比时, “光速无限” 假设不再成立, 光在场景中的传输是随着时间而变化的暂态分布, 因此, 时间分辨能力需要有质的飞跃, 才能够捕捉光的运动.

1999 年的诺贝尔化学奖授予了开创飞秒化学领域的 Zewail 教授⁴, 他发明了飞秒激光技术, 能够检测到化学反应中化学键的断裂. 但飞秒化学中的成像维度与分辨率均针对微观世界特定事件的观测, 无法应用于宏观世界的超高速摄像. 2012 年, 麻省理工学院的 Velten 等将飞秒激光技术应用于计算摄像学⁵, 基于如图 15 (a) 所示的原理, 成功实现了宏观场景的飞秒成像应用^[81], 并于次年实现了宏观场景的万亿帧每秒的超高速视频采集^[82], 该系统可称为 “光速相机”, 每一帧的有效曝光时间是 2 万亿分之一秒, 重构结果能够以约 0.5×10^{12} 帧每秒的速率显示光的运动. 在如此高的帧率下, 直接记录场景中的反射、散射光无法达到足够的亮度, 因此, 该系统使用 “频闪” 的方法, 通过时间与视角上的精确扫描控制, 对同一时刻、同一视角进行数百万次的重复测量, 以累积足够高的光通量, 如图 15 (b) 所示.

飞秒摄像技术能够采集到光与场景相互作用下, 时间解析的多次反射、散射光传输, 因此, 能够创新性地绕过 “拐角” 成像遮挡物体的几何结构^[81, 83-84], 如图 16 (a) 和 16 (b) 所示; 检测遮挡情况下的场景运动信息^[85], 如图 16 (c) 所示; 实现户外环境下、无需环绕光照与采集装置的双向反射分布函数 (Bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 的采集^[86], 如图 16 (d) 所示. 飞秒摄像学不仅能够为艺术与教育提供崭新的可视化视角, 还在众多其他领域有着重要应用, 包括工业成像中的误差与材料特性分析、科学研究中的超快过程理解、医学成像中 “超声成像的光学实现” 等.

⁴http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1999/press.html

⁵<http://web.media.mit.edu/~raskar/trillionfps/>



(a) 一维飞秒成像系统原理图及传感器捕获的数据
(a) Scheme of the 1D femto imaging system and the captured data on the sensor

(b) 二维飞秒成像示意图
(b) Illustration of the 2D femto imaging

图 15 一维空间及二维空间飞秒成像系统原理示意^[82]
Fig. 15 Femto-photography system and its inside^[82]

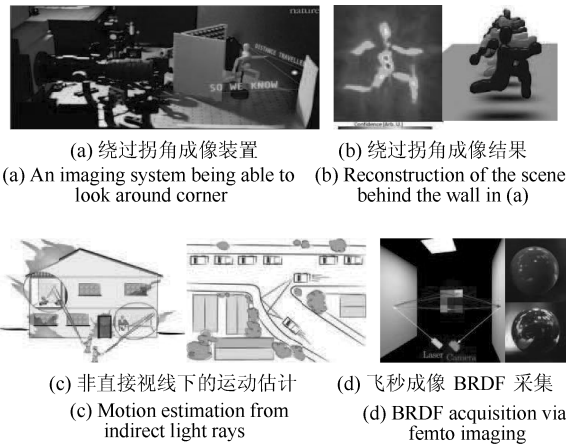


图 16 飞秒成像的应用实例^[81, 85-86]
Fig. 16 The applications of femto imaging^[81, 85-86]

通过能捕捉光运动的飞秒成像数据, Wu 等^[87]建立了各光传输分量的时间函数模型, 能够将全局光传输进一步分解为相互反射及亚表面散射分量, 且为材质检测与参数测量等视觉应用提供了新的思路. 该计算成像方法实现了飞秒成像在光传输研究领域的新发展与应用, 如图 17 所示. 进一步, 针对超高时间分辨下四维稳态光传输的时间维度缺失问题, Wu 等^[88]建立时间解析的五维光传输频域分析理论; 发现暂态光传输下的交叉维度信息传输特性, 分析信息传输带宽及理论上限; 实现时间解析的新型超快无镜头计算成像系统, 如图 18 所示. 该计算

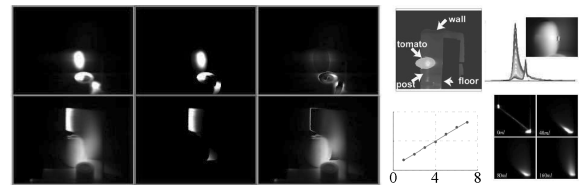


图 17 时间解析的全局光传输分解及其应用^[87]
Fig. 17 Time-resolved global light transport decomposition and its applications^[87]

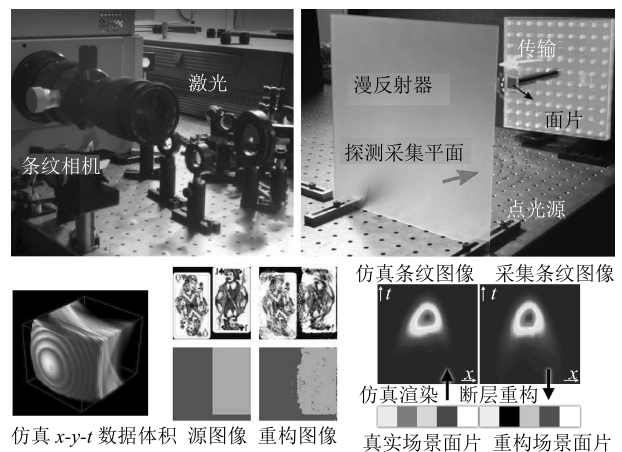


图 18 暂态光传输的超快无镜头计算成像系统及结果示例^[88]
Fig. 18 Ultra-fast lensless computational imaging systems based transient light transport^[88]

成像方法克服了由镜头引入的成像局限性, 实现了计算成像新自由度的拓展.

6 动态范围与极化

七维全光函数的幅值表示其动态范围; 光是横波, 在与传播方向垂直的平面内发生振动, 因此极化方向也是光信号的重要特性之一.

传感器将光信号转换为电信号, 并对电信号进行模数转换以及量化, 每个像素是通常是由 8 比特表示, 也就是说每个像素所能记录的场景亮度变化范围只有 0~255 个量级. 真实世界中, 场景的亮度变化范围极大, 如极为强烈的太阳光及柔和的月光, 其动态范围涵盖 10^{-6} ~ 10^8 量级. 因此, 相机对场景信号动态范围的采集严重不足.

很多计算机视觉领域的算法和系统均假设输入图像的采集环境是真空, 而不受空气中介质的影响而衰减. 该假设实际上并不成立, 当出现雾气、雨、雪等天气时, 介质便不仅仅是空气分子, 在成像中起主导作用的是复杂水分子的聚合体, 从而使得在上述恶劣天气条件下视觉可见性大大降低.

6.1 场景光路

无论相机的动态范围有多大, 当出现杂光 (杂光是一种由于光线在镜头、机身、传感器内多次散射造成的全局光照作用) 时, 相机能用于采集场景信息的动态范围将大大减少, 也即采集到的场景对比度大大降低. Talvala 等^[89] 通过利用放置在相机前的掩模模式分开测量相机内传输光线的直接成分与间接成分方法, 来增大相机所能采集到的对应场景最大动态范围.

在水下成像中, 由于光在水中的严重散射作用, 可见性大大降低, Narasimhan 等利用主动光源技术^[90-91], 设计特殊的光源和采集设备实现复杂介质下的清晰成像.

6.2 相机光路

Debevec 等^[92] 首先研究了如何基于普通低动态范围相机采集高动态范围场景. 为了能够对运动场景进行高动态范围成像, Kang 等^[93] 在 2003 年提出了 HDR 视频框架与算法, 对动态场景进行交替长短曝光的采集, 通过将某一帧图像的前后相邻帧图像对齐到该图像本身, 可以获得统一场景的不同曝光结果.

由哥伦比亚大学的 Nayar 及卡耐基梅隆大学的 Narasimhan 领衔, 基于多幅特殊拍摄图像的研究主要分为两类, 一是获取同一场景在不同恶劣天气条件下 (如薄雾和浓雾) 的采集图像^[94-96], 该方法仅适用于固定场景、固定相机、并且需要出现变化的

天气, 因此实际应用性弱.

6.3 计算重构

许多实际情况下, 能够实时的把已有 LDR 图像 (或视频) 进行增强转换为 HDR 图像 (或视频) 并在 HDR 显示上进行显示^[97] 同样具有重要价值.

仅基于单幅输入图像而不需要任何其他辅助信息, 直接对该图像进行可见性恢复与增强^[98-101]. 这种方法具有最大的适应性, 但是由于只具有很少量的信息, 这类方法通常基于较强的假设或者先验知识, 例如, 假设实际在晴朗天气条件下的采集图像具有很高的对比度^[100]; 假设场景的实际具有丰富的颜色信息^[98] 等.

7 联合维度采集

前述空间、角度、频谱、时间维度以及动态范围和极化性质对场景信息都具有不同的表征作用, 然而, 在某些情况下, 需要更高维度的联合采集才能够获取目标场景性质, 或者通过联合维度采集实现更高自由度的优化成像, 通常将联合维度的物理量称为光传输. 基于光路可逆原理, Sen 等构建了相机-投影系统, 实现了能够计算互换相机投影位置的光传输采集及应用^[102], 这也是成像遮挡物体的代表性工作之一. 计算机图形学的研究热点之一是重光照, 为了在场景几何位置的情况下, 获取高真实感的重光照结果, 需要对描述光源与场景相互作用的光传输矩阵进行采集, 但其维度高、信息量大, 难以实现有效采集. 但结合近年来蓬勃发展的压缩感知理论与技术, 能够大大降低采样数据量^[103], 而是通过计算重构完整光传输信息. 图 19 列出了计算摄像学方向的现有代表性成像方法所对应的光传输采样空间.

8 光的其他特性

前面所述的研究工作均是在全光函数所描述光线的基础上进行的, 对光的波动性探索与运用得很少. 基于空间光调制器的波面整形使得穿透浑浊介质层的广视场成像成为可能^[104], 且无需相关光源, 这种方法也可以应用于遮挡物体成像, 如图 20 所示. 另一方面, 光的相干性与衍射特性可以用于高精度无镜头显微成像^[105], 基于可控的部分相干光源的成像机制如图 21 所示.

9 未来展望

近 20 年来, 相机/摄像学的发展并未突破胶片相机的传统成像模型 (透镜模型, 聚焦于传感器平面), 而是在其基础上做到了更快、更清晰、更易存取, 但信息数字化扩大了对图像信号的处理空间, 且计算科学与技术 (信号处理、视觉、图形学等) 的飞

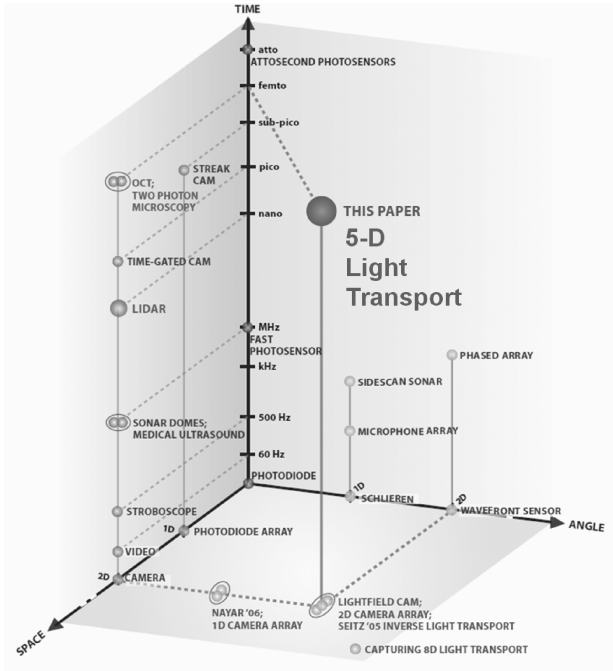


图 19 现有代表性成像方法对应的光传输采样空间^[106]
 Fig. 19 Popular imaging techniques and their plots in the Space-angle-time axes^[106]

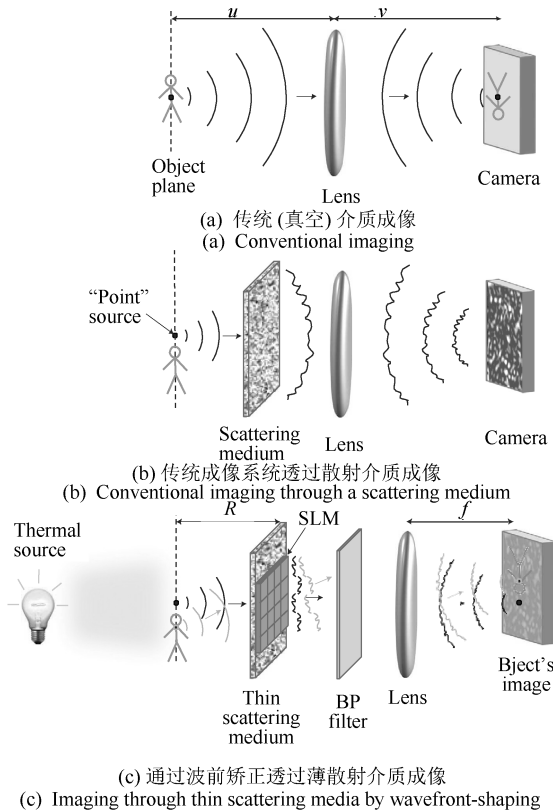


图 20 基于散射非相干光的穿透介质实时成像方法^[104]
 Fig. 20 Looking through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light^[104]

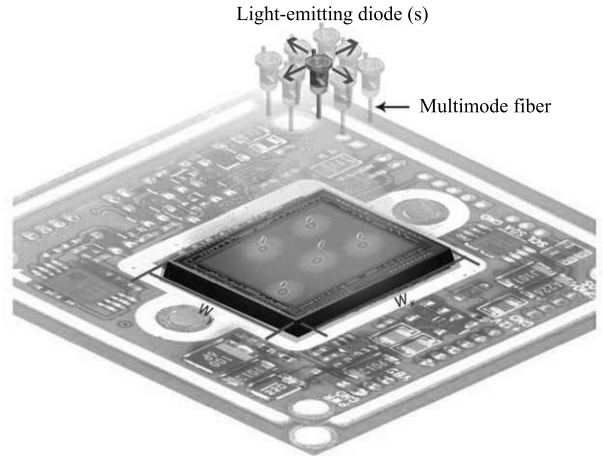


图 21 大视场片上无镜头显微系统及其应用^[105]
 Fig. 21 Wide-field on-chip microscopy without lenses and its applications^[105]

速发展也将摄像带入了计算时代. 计算摄像学提出至今的近 20 年, 大多数研究都是围绕着传统成像模型, 对其各组成部分引入计算, 包括计算光照、计算镜头、计算传感和计算显示, 以实现更丰富、更有效的信息获取, 相关研究已经相对成熟. 最后, 回归到计算摄像学研究的本质目标: 光信号的高维高分辨率计算成像, 如何更深入地探索光信号传输过程中各维度之间的耦合特性, 以实现高分辨率高维度场景信息的联合重构, 也许是未来计算摄像学新的研究体系. 本文只是对计算摄像学中的高维信息的时间维度耦合与解析问题进行了初步探索, 期望未来的研究能够进一步革新传统成像模型, 建立全新成像平台, 包括新型仿生物视觉成像等, 实现完整的场景体验重建.

References

- Adelson E H, Bergen J R. The plenoptic function and the elements of early vision. *Computational Models of Visual Processing*. Cambridge, MA: MIT Press, 1991. 3–20
- Liu Y B, Dai Q H, Xu W L. A point-cloud-based multiview stereo algorithm for free-viewpoint video. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2010, **16**(3): 407–418
- Adams A, Talvala E V, Park S H, Jacobs D E, Ajdin B, Gelfand M, Dolson J, Vaquero D, Baek J, Tico M, Lensch H P A, Matusik W, Pulli K, Horowitz M, Levoy M. The Frankencamera: an experimental platform for computational photography. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, **29**(4): Article No. 29
- Ng R, Levoy M, Brédif M, Duval G, Horowitz M, Hanrahan P. Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera, Computer Science Technical Report CTSR 2005-02, Stanford, 2005.
- Ng R. Fourier slice photography. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(3): 735–744

- 6 Johnson M K, Cole F, Raj A, Adelson E H. Microgeometry capture using an elastomeric sensor. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, **30**(4): Article No. 46
- 7 Debevec P, Wenger A, Tchou C, Gardner A, Waese J, Hawkins T. A lighting reproduction approach to live-action compositing. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, **21**(3): 547–556
- 8 Wenger A, Gardner A, Tchou C, Unger J, Hawkins T, Debevec P. Performance relighting and reflectance transformation with time-multiplexed illumination. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(3): 756–764
- 9 Einarsson P, Chabert C F, Jones A, Ma W C, Lamond B, Hawkins T, Bolas M, Sylvan S, Debevec P. Relighting human locomotion with flowed reflectance fields. In: Proceedings of the 17th Eurographics Conference on Rendering Techniques. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2006. 183–194
- 10 Wu D, Liu Y B, Ihrke I, Dai Q H, Theobalt C. Performance capture of high-speed motion using staggered multi-view recording. *Computer Graphics Forum*, 2012, **31**(7): 2019–2028
- 11 Vlastic D, Peers P, Baran I, Debevec P, Popović J, Rusinkiewicz S, Matusik W. Dynamic shape capture using multi-view photometric stereo. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, **28**(5): Article No. 174
- 12 Ghosh A, Fyffe G, Tunwattanapong B, Busch J, Yu X, Debevec P. Multiview face capture using polarized spherical gradient illumination. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, **30**(6): Article No. 129
- 13 Tunwattanapong B, Fyffe G, Graham P, Busch J, Yu X M, Ghosh A, Debevec P. Acquiring reflectance and shape from continuous spherical harmonic illumination. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, **32**(4): Article No. 109
- 14 Chen T B, Lensch H P, Fuchs C, Seidel H P. Polarization and phase-shifting for 3D scanning of translucent objects. In: Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, USA: IEEE, 2007. 1–8
- 15 Gupta M, Tian Y D, Narasimhan S G, Zhang L. Defocusing on global light transport for active scene recovery. In: Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL: IEEE, 2009. 2969–2976
- 16 Zhang L, Nayar S. Projection defocus analysis for scene capture and image display. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, **25**(3): 907–915
- 17 Gupta M, Agrawal A, Veeraraghavan A, Narasimhan S G. Structured light 3D scanning in the presence of global illumination. In: Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, RI: IEEE, 2011. 713–720
- 18 Gupta M, Nayar S K. Micro phase shifting. In: Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, RI: IEEE, 2012. 813–820
- 19 Gu J W, Nayar S, Grinspun E, Belhumeur P, Ramamoorthi R. Compressive structured light for recovering inhomogeneous participating media. In: Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. 845–858
- 20 Cossairt O S, Miao D, Nayar S K. Scaling law for computational imaging using spherical optics. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, **28**(12): 2540–2553
- 21 Brady D J, Gehm M E, Stack R A, Marks D L, Kittle D S, Golish D R, Vera E M, Feller S D. Multiscale gigapixel photography. *Nature*, 2012, **486**(7403): 386–389
- 22 Wu C L, Liu Y B, Dai Q H, Wilburn B. Fusing multiview and photometric stereo for 3D reconstruction under uncalibrated illumination. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011, **17**(8): 1082–1095
- 23 Ben-Ezra M, Zomet A, Nayar S K. Video super-resolution using controlled subpixel detector shifts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, **27**(6): 977–987
- 24 Deng Y, Liu Y B, Dai Q H, Zhang Z K, Wang Y. Noisy depth maps fusion for multiview stereo via matrix completion. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2012, **6**(5): 566–582
- 25 Heide F, Rouf M, Hullin M B, Labitzke B, Heidrich W, Kolb A. High-quality computational imaging through simple lenses. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, **32**(5): Article No. 149
- 26 Wetzstein G, Raskar R, Heidrich W. Hand-held schlieren photography with light field probes. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Computational Photography. Pittsburgh, USA: IEEE, 2011. 1–8
- 27 Wetzstein G, Roodnick D, Heidrich W, Raskar R. Refractive shape from light field distortion. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain: IEEE, 2011. 1180–1186
- 28 Levoy M, Ng R, Adams A, Footer M, Horowitz M. Light field microscopy. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, **25**(3): 924–934
- 29 Liang C K, Lin T H, Wong B Y, Liu C, Chen H H. Programmable aperture photography: multiplexed light field acquisition. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3): Article No. 55
- 30 Veeraraghavan A, Raskar R, Agrawal A, Mohan A, Tumblin J. Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3): Article No. 69
- 31 Raskar R, Agrawal A, Wilson C A, Veeraraghavan A. Glare aware photography: 4d ray sampling for reducing glare effects of camera lenses. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3): Article No. 56
- 32 Wilburn B, Joshi N, Vaish V, Talvala E V, Antunez E, Barth A, Adams A, Horowitz M, Levoy M. High performance imaging using large camera arrays. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(3): 765–776
- 33 Vaish V, Garg G, Talvala E V, Antunez E, Wilburn B, Horowitz M, Levoy M. Synthetic aperture focusing using a shear-warp factorization of the viewing transform. In: Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, D. C., USA: IEEE, 2005. 129
- 34 Green P, Sun W Y, Matusik W, Durand F. Multi-aperture photography. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3): Article No. 68

- 35 Levin A, Fergus R, Durand F, Freeman W T. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3): Article No. 70
- 36 Dowski Jr E R, Johnson G E. Wavefront coding: a modern method of achieving high-performance and/or low-cost imaging systems. In: Proceedings of the 1999 SPIE Conference on Current Developments in Optical Design and Optical Engineering VIII. SPIE, 1999, **3779**: 137–145
- 37 Levin A, Hasinoff S W, Green P, Durand F, Freeman W T. 4D frequency analysis of computational cameras for depth of field extension. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, **28**(3): Article No. 97
- 38 Lin X, Suo J L, Wetzstein G, Dai Q H, Raskar R. Coded focal stack photography. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computational Photography. Cambridge, USA: IEEE, 2013. 1–9
- 39 Bando Y, Holtzman H, Raskar R. Near-invariant blur for depth and 2D motion via time-varying light field analysis. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, **32**(2): Article No. 13
- 40 Wetzstein G, Lanman D, Heidrich W, Raskar R. Layered 3D: tomographic image synthesis for attenuation-based light field and high dynamic range displays. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, **30**(4): Article No. 95
- 41 Lanman D, Wetzstein G, Hirsch M, Heidrich W, Raskar R. Polarization fields: dynamic light field display using multi-layer LCDs. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, **30**(6): Article No. 186
- 42 Wetzstein G, Lanman D, Hirsch M, Raskar R. Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, **31**(4): Article No. 80
- 43 Grosse M, Wetzstein G, Grundhoefer A, Bimber O. Coded aperture projection. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, **29**(3): Article No. 22
- 44 Ma C G, Suo J L, Dai Q H, Raskar R, Wetzstein G. High-rank coded aperture projection for extended depth of field. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computational Photography. Cambridge, USA: IEEE, 2013. 1–9
- 45 Levin A, Freeman W T, Durand F. Understanding camera trade-offs through a Bayesian analysis of light field projections. In: Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 88–101
- 46 Bishop T E, Zanetti S, Favaro P. Light field superresolution. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Computational Photography. San Francisco, USA: IEEE, 2009. 1–9
- 47 Marwah K, Wetzstein G, Bando Y, Raskar R. Compressive light field photography using overcomplete dictionaries and optimized projections. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, **32**(4): Article No. 46
- 48 Levin A, Durand F. Linear view synthesis using a dimensionality gap light field prior. In: Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA: IEEE, 2010. 1831–1838
- 49 Lin X, Suo J L, Cao X, Dai Q H. Iterative feedback estimation of depth and radiance from defocused images. In: Proceedings of the 11th Asian Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. 95–109
- 50 Karsch K, Hedau V, Forsyth D, Hoiem D. Rendering synthetic objects into legacy photographs. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, **30**(6): Article No. 157
- 51 Mohan A, Raskar R, Tumblin J. Agile spectrum imaging: Programmable wavelength modulation for cameras and projectors. *Computer Graphics Forum*, 2008, **27**(2): 709–717
- 52 Cao X, Du H, Tong X, Dai Q H, Lin S. A prism-mask system for multispectral video acquisition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(12): 2423–2435
- 53 Cao X, Tong X, Dai Q H, Lin S. High resolution multispectral video capture with a hybrid camera system. In: Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, RI: IEEE, 2011. 297–304
- 54 Luo X Y, Zhang J, Dai Q H. A regional image fusion based on similarity characteristics. *Signal Processing*, 2012, **92**(5): 1268–1280
- 55 Edgerton H E. *Electronic flash, strobe (3rd edition)*. Cambridge: The MIT Press, 1987.
- 56 Theobalt C, Albrecht I, Haber J, Magnor M, Seidel H P. Pitching a baseball: tracking high-speed motion with multi-exposure images. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, **23**(3): 540–547
- 57 Narasimhan S G, Koppal S J, Yamazaki S. Temporal dithering of illumination for fast active vision. In: Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. 830–844
- 58 Veeraraghavan A, Reddy D, Raskar R. Coded strobing photography: compressive sensing of high speed periodic videos. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(4): 671–686
- 59 Bub G, Tecza M, Helmes M, Lee P, Kohl P. Temporal pixel multiplexing for simultaneous high-speed, high-resolution imaging. *Nature Methods*, 2010, **7**(3): 209–211
- 60 Shechtman E, Caspi Y, Irani M. Increasing space-time resolution in video. In: Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. 753–768
- 61 Shechtman E, Caspi Y, Irani M. Space-time super-resolution. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, **27**(4): 531–545
- 62 Wilburn B, Joshi N, Vaish V, Levoy M, Horowitz M. High-speed videography using a dense camera array. In: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, D. C.: IEEE, 2004. II-294–II-301
- 63 Agrawal A, Gupta M, Veeraraghavan A, Narasimhan S G. Optimal coded sampling for temporal super-resolution. In: Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, USA: IEEE, 2010. 599–606

- 64 Liu Y B, Cao X, Dai Q H, Xu W L. Continuous depth estimation for multi-view stereo. In: Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL: IEEE, 2009. 2121–2128
- 65 Li K, Dai Q H, Xu W L. Markless shape and motion capture from video sequences. *IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology*, 2011 **21**(3): 320–334
- 66 Li H, Luo L J, Vlasic D, Peers P, Popović J, Pauly M, Rusinkiewicz S. Temporally coherent completion of dynamic shapes. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, **31**(1): Article No. 2
- 67 Joshi N, Kang S B, Zitnick C L, Szeliski R. Image deblurring using inertial measurement sensors. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, **29**(4): Article No. 30
- 68 Nayar S, Ben-Ezra M. Motion-based motion deblurring. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(6): 689–698
- 69 Tai Y W, Du H, Brown M S, Lin S. Correction of spatially varying image and video motion blur using a hybrid camera. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, **32**(6): 1012–1028
- 70 Agrawal A, Xu Y, Raskar R. Invertible motion blur in video. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, **28**(3): Article No. 95
- 71 Raskar R, Agrawal A, Tumblin J. Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, **25**(3): 795–804
- 72 Levin A, Sand P, Cho T S, Durand F, Freeman W T. Motion-invariant photography. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3): Article No. 71
- 73 Cho T S, Levin A, Durand F, Freeman W T. Motion blur removal with orthogonal parabolic exposures. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Computational Photography. Cambridge, USA: IEEE, 2010. 1–8
- 74 Li W, Zhang J, Dai Q H. Exploring aligned complementary image pair for blind motion deblurring. In: Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, RI: IEEE, 2011. 273–280
- 75 Fergus R, Singh B, Hertzmann A, Roweis S T, Freeman W T. Removing camera shake from a single photograph. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, **25**(3): 787–794
- 76 Shan Q, Jia J Y, Agarwala A. High-quality motion deblurring from a single image. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3): Article No. 73
- 77 Cho S, Matsushita Y, Lee S. Removing non-uniform motion blur from images. In: Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Computer Vision. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2007. 1–8
- 78 Tai Y W, Tan P, Brown M S. Richardson-lucy deblurring for scenes under a projective motion path. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(8): 1603–1618
- 79 Whyte O, Sivic J, Zisserman A, Ponce J. Non-uniform deblurring for shaken images. *International Journal of Computer Vision*, 2012, **98**(2): 168–186
- 80 Mahajan D, Huang F C, Matusik W, Ramamoorthi R, Belhumeur P. Moving gradients: a path-based method for plausible image interpolation. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, **28**(3): Article No. 42
- 81 Velten A, Willwacher T, Gupta O, Veeraraghavan A, Bawendi M G, Raskar R. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging. *Nature Communications*, 2012, **3**: Article No. 745
- 82 Velten A, Wu D, Jarabo A, Masia B, Barsi C, Joshi C, Lawson E, Bawendi M, Gutierrez D, Raskar R. Femtophotography: capturing and visualizing the propagation of light. 2013, **32**(4): Article No. 44
- 83 Gupta O, Willwacher T, Velten A, Veeraraghavan A, Raskar R. Reconstruction of hidden 3d shapes using diffuse reflections. *Optics Express*, 2012, **20**(17): 19096–19108
- 84 Kirmani A, Hutchison T, Davis J, Raskar R. Looking around the corner using transient imaging. In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Computer Vision, Kyoto, Japan, 2009. 159–166
- 85 Naik N, Zhao S, Velten A, Raskar R, Bala K. Single view reflectance capture using multiplexed scattering and time-of-flight imaging. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, **30**(6): Article No. 171
- 86 Pandharkar R, Velten A, Bardagjy A, Lawson E, Bawendi M, Raskar R. Estimating motion and size of moving non-line-of-sight objects in cluttered environments. In: Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, RI: IEEE, 2011. 265–272
- 87 Wu D, O’Toole M, Velten A, Agrawal A, Raskar R. Decomposing global light transport using time of flight imaging. In: Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, USA: IEEE, 2012. 366–373
- 88 Wu D, Wetzstein G, Barsi C, Willwacher T, O’Toole M, Naik N, Dai Q, Kutulakos K, Raskar R. Frequency analysis of transient light transport with applications in bare sensor imaging. In: Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. 542–555
- 89 Talvala E V, Adams A, Horowitz M, Levoy M. Veiling glare in high dynamic range imaging. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3): Article No. 37
- 90 Narasimhan S G, Nayar S K, Sun B, Koppal S J. Structured light in scattering media. In: Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision. Beijing, China: IEEE, 2005. 420–427
- 91 Gupta M, Narasimhan S G, Schechner Y Y. On controlling light transport in poor visibility environments. In: Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, USA: IEEE, 2008. 1–8
- 92 Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In: Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 2008. 369–378
- 93 Kang S B, Uyttendaele M, Winder S, Szeliski R. High dynamic range video. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, **22**(3): 319–325
- 94 Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere. *International Journal of Computer Vision*, 2002, **48**(3): 233–254

- 95 Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(6): 713–724
- 96 Narasimhan S G, Nayar S K. Interactive (de)weathering of an image using physical models. In: Proceedings of the 2003 IEEE Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision. Nice, France: IEEE, 2003. 1–8
- 97 Rempel A G, Trentacoste M, Seetzen H, Young H D, Heidrich W, Whitehead L, Ward G. Ldr2hdr: on-the-fly reverse tone mapping of legacy video and photographs. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3): Article No. 39
- 98 Tan R T. Visibility in bad weather from a single image. In: Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, USA: IEEE, 2008. 1–8
- 99 Fattal R. Single image dehazing. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, **27**(3): Article No. 72
- 100 He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior. In: Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL: IEEE, 2009. 1956–1963
- 101 Tarel J P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Computer Vision. Kyoto, Japan: IEEE, 2009. 2201–2208
- 102 Sen P, Chen B, Garg G, Marschner S R, Horowitz M, Levoy M, Lensch H P A. Dual photography. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(3): 745–755
- 103 Peers P, Mahajan D K, Lamond B, Ghosh A, Matusik W, Ramamoorthi R, Debevec P. Compressive light transport sensing. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, **28**(1): Article No. 3
- 104 Katz O, Small E, Silberberg Y. Looking around corners and through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light. *Nature Photonics*, 2012, **6**(8): 549–553
- 105 Greenbaum A, Luo W, Su T W, Göröcs Z, Xue L, Isikman S O, Coskun A F, Mudanyali O, Ozcan A. Imaging without lenses: achievements and remaining challenges of wide-field on-chip microscopy. *Nature Methods*, 2012, **9**(9): 889–895
- 106 Raskar R. Popular imaging techniques and their plots in the space-angle-time axes [Online], available: <http://web.media.mit.edu/~raskar/cornar/>, July 18, 2014.



索津莉 清华大学自动化系讲师。2004 年获山东大学学士学位, 2010 年获中国科学院研究生院博士学位。主要研究方向为计算摄像学和计算机视觉。本文通信作者。E-mail: jlsuo@tsinghua.edu.cn
(**SUO Jin-Li** Lecturer in the Department of Automation, Tsinghua University. She received her bachelor

degree from Shandong University in 2004 and Ph.D. degree from Graduate University of Chinese Academy of Sciences in 2010. Her research interest covers computational photography and computer vision. Corresponding author of this paper.)



刘焯斌 清华大学自动化系副教授。2002 年获北京邮电大学学士学位, 2009 年获清华大学博士学位。主要研究方向为基于图像的建模与渲染, 无标记运动捕捉和基于视觉的图形学应用。E-mail: liuyebin@mail.tsinghua.edu.cn
(**LIU Ye-Bin** Associate professor in the Department of Automation, Tsinghua University. He received his bachelor degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2002, and Ph.D. degree from Tsinghua University in 2009. His research interest covers image-based modeling and rendering, markerless motion capture and vision based graphics applications.)



季向阳 清华大学自动化系副教授。1999 年和 2001 年分别获哈尔滨工业大学学士和硕士学位, 2008 年获中国科学院计算技术研究所博士学位。主要研究方向为图像与视频编码和多媒体信息处理。E-mail: xyji@tsinghua.edu.cn
(**JI Xiang-Yang** Associate professor in the Department of Automation, Tsinghua University. He received his bachelor degree and master degree from Harbin Institute of Technology in 1999 and 2001, and received his Ph.D. degree from the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences in 2008. His research interest covers video/image coding and multimedia processing.)



戴琼海 清华大学自动化系教授。1987 年获陕西师范大学学士学位, 1994 年和 1996 年分别获东北大学硕士与博士学位。主要研究方向为信号处理, 计算摄像学, 计算机视觉和图形学。E-mail: qhdai@tsinghua.edu.cn
(**DAI Qiong-Hai** Professor in the Department of Automation, Tsinghua University. He received his bachelor degree from Shaanxi Normal University in 1987, and received his master degree and Ph.D. degree from Northeastern University in 1994 and 1996. His research interest covers signal processing, computational photography, computer vision, and computer graphics.)